科学読本

音とオーディオ(8)

平田能睦

7章：巧みな測定

超音波を発しながら暗闇を飛ぶコウモリにとって，洞窟の中を飛び交う何百もの仲間のコウモリは障害となりません．微弱な反射音を騒音の中で聴き分けるコウモリの能力には誰もが驚かされます．音響測定で信号音と雑音を区別する技術は測定値の信頼性を左右するので，極めて重要です．雑音を除くためにどのような技術を用いることができるか，という点に注目して，音の測定法をいくつか取り上げます．

インパルス応答の特徴

インパルス応答のフーリエ変換によって，周波数振幅特性と位相特性が求まります．周波数分析にコンピュータが使われるようになったころ，インパルス応答の分析結果を鵜呑みにしてまちがいを見過ごす，という落とし穴に少なからぬ人がはまりました．

アナログ方式の測定では起こり得ないことですが，たとえば，スピーカのインパルス応答からその周波数特性を求めるときに，インパルス応答に加わったわずかな低周波数の雑音や反射音が，コンピュータによる分析結果に大きく影響することがあります．

インパルスを正弦波に分解するとその一つ一つの大きさはごくわずかなものになります．特に，スピーカのインパルス応答は低い周波数成分が少ないので，低周波数のノイズの影響を受けやすくなりますが，やっかいなことにコンピュータで分析するために波形を切り出すと，正負のバランスがくずれてもとの波形には含まれていない直流成分や低周波数成分が分析結果に現われてきます．

インパルス応答波形に加わる雑音を減らす方法としてよく知られているのは，信号入力を時間の基準点として応答波形をつぎつぎと加え合わせて行く，同期加算と呼ばれる方法です．この方法を使えば信号成分の波形は位置をぴったり合わせて加算されるので，N回の同期加算によって信号波形の振幅はN倍となり，パワーはNの2乗倍になります．

一方，雑音成分は毎回の波形が異なるので，N回加算したときの雑音のパワーは毎回の雑音のパワーの和になります．こうして，N回の同期加算の後に振幅をNで割ると，信号成分の波形の振幅はもとの大きさになりますが，雑音成分のパワーは平均で1/N，振幅は$1/\sqrt{N}$に減少します．

雑音の大きさがほぼ同じ状態であれば，同期加算2回で雑音成分は3 dB，10回で10 dB，100回で20 dB減少することになります．

微弱な光を放つ星を撮影する場合にカメラの露出時間を長くすることは，ノイズとなる光を相対的に減らす点で同期加算と同じ効果を与えます．この場合に同期に相当する作業は，カメラの向きを常に目的とする星に正確に合わせておくことです．そのときに基準点となる星をガイド星といいます．

同期加算法で問題になるのは，雑音が多い場合にこれを十分減らそうとすると，加算数が大きくなり，かなり時間がかかることです．たとえば，1回のインパルス応答を1秒で測定できるとしても，雑音を40dB減らすためには10,000回の加算が必要になり，これに要する時間は約3時間です．もしもその間に突発的に大きな雑音が加わると，それまでの加算効果はかなり損なわれてしまいます．

このような理由から，インパルス応答の測定はなるべく静かな環境の下で行なうのですが，人の耳には静かなようでも，一般に物理的な騒音の大きさは周波数が低くなるほど増加していて，その影響は無視できません．

そこで，インパルスを直接入力信号として用いずに，インパルスの積分波形に相当するステップ信号を入力し，これによって得た応答波形を微分してインパルス応答を求めれば，低周波数帯域の雑音を大幅に減

ホン出力からその2乗した値を得，これを積分して，インパルス音を含む半分と含まない半分との差を求め，この差分を加算して行きます．

マイクロホン出力にはインパルス音とその背景にある騒音に対応した電圧が生じていますが，N回加算した差分をNで割ると，その値は，インパルス音の2乗の積分値（パワー）と，雑音成分――インパルス音とN個の騒音を平均した波形との積の積分値で与えられる――を加え合わせたものになります．

同期加算では，雑音成分はN個の騒音を加え合わせた波形の2乗の積分値（第一近似は，N個の騒音のパワーの和で表わせる）をNの2乗で割った値になりますが，上記差分の雑音成分は，Nが十分大きいと第一近似の項は0になり，同期加算では無視された信号と雑音の積を積分した量で与えられます．これは同期加算した場合よりも，雑音成分のパワーは一段と小さくなります．

この方法＝名付けて差分累積法は，精度の高い同期を必要としないので，これも現場測定にとって都合よいことです．実験によれば，Nが5回で約10 dBの雑音低減効果が得られています．騒音で信号音が聴き取れない程度でも，Nを20か30とすれば，十分な精度で信号音のパワーを計測することができます．

残響の減りかた

残響の強さが時間の経過とともに減少して行く様子を示す残響曲線は，室の音響特性を知るために欠かせないものです．残響時間はこの曲線から求められます．室内音響測定で最も基本的なこの残響曲線を得るために払われた努力の1つは，雑音の影響をいかに除くか，ということでした．

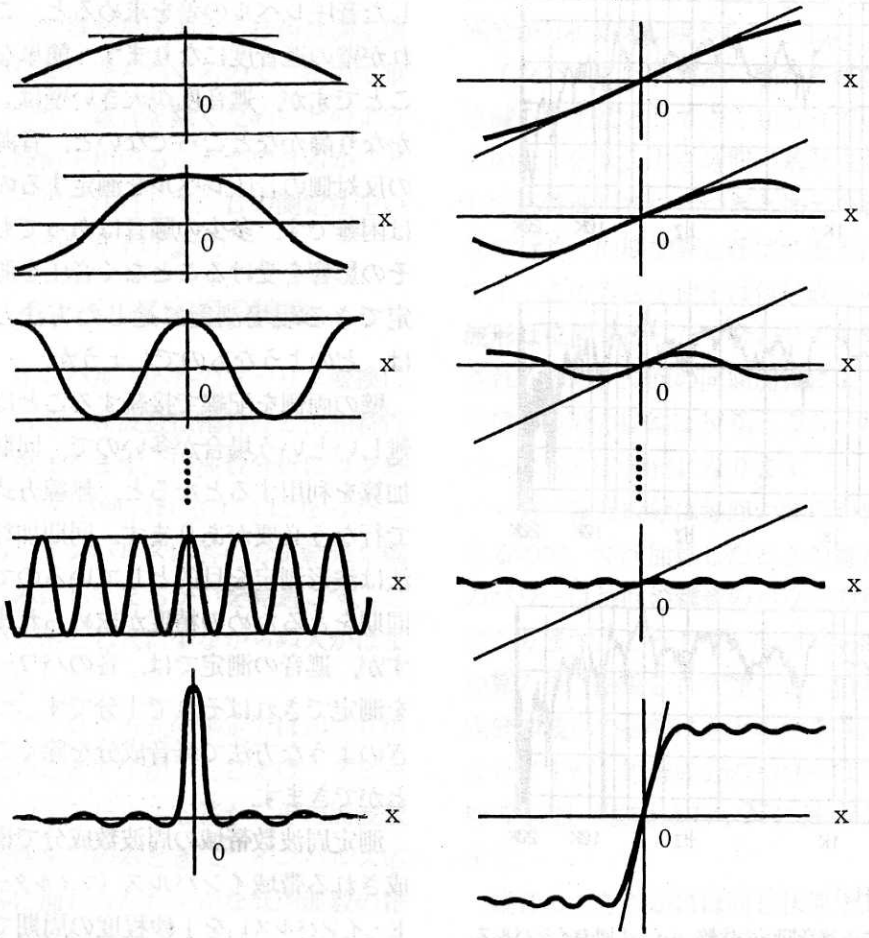
残響時間は音源が停止してから音の強さ（エネルギー）が百万分の一に減衰するまでの時間と定義されています．これを音圧の波形で表わすと，指数関数的に減少していく振幅が千分の一になるまでの時間です．振幅を対数で表わすと，この音圧の減衰は直線的になり，音圧レベルが60 dB下がった時点が残響時間になります．

とはいえ静かなコンサート・ホールでも，雑音の影響を受けずにスピーカから出た音が室内で文字どおり60 dB減衰するまで測定できることはまれです．そこで，通常は音圧レベルが40 dB（振幅で1/100）減衰する付近まで正しく測定できるようにスピーカの音量を上げて，測定できた残響曲線を外挿した値で残響時間を求めます．

残響時間は対数表示で直線になると決まっているなら，これで十分ですが，一般に残響曲線には折れ曲がりがあります．この折れ曲がりは，雑音によっても室の形状によっても生じます．

信号と雑音を区別することは計測の基本条件で，これができなければ雑音をどれほど抑圧したとしても計測とはいえません．帯域雑音を断続して繰り返し残響波形を記録し，その平均的な減衰から残響曲線を求める従来法では，室の騒音レベルを記録しておくことで雑音の影響する限界のレベルを知ることができます．

インパルス積分法と呼ばれる残響曲線の測定法は，1回の測定によってきれいな残響曲線（集合平均的残響曲線）を得られるということから，提案された当初は注目されました



〈第7.2図〉振幅の等しいコサイン波形cos (nx) を加え合せるとインパルス波形（左下）が，傾きの等しいサイン波形 (1/n) sin (nx) を加え合せるとステップ波形（右下）が，得られる．右の波形を微分すると，左の波形になる

V2を使えば，斜め入射吸音率は，

$$\alpha(\theta) = 1 - (V1/V2)^2$$

で与えられます．

式も簡単，原理も簡単ですが，グラスウール板を無響室に吊して回転させ，この電気的消去法により0°から90°までの全入射角に対する吸音率を初めて実測できたのは，1972年のことです．

サンプリング周波数について

信号波形の情報をまったく失うことなく離散的なデータで表わすためには，少なくとも信号の周波数帯域幅の2倍の周波数で波形をサンプリングする必要があり，これはサンプリング定理として知られています．しかし，音響信号の低い方の周波数は十分小さいので，サンプリング周波数は信号の最大周波数の少なくとも2倍，という表現が用いられています．

周波数分析をするのでなければ，音響測定で波形を離散的データに変換する場合に，かならずしもサンプリング定理に従う必要はありません．たとえば，同期乗算法を用いて残響曲線を求めるときに必要なのは残響音のパワー減衰ですから，音圧波形を見るよりもはるかにマクロな見かたで現象を観察することになります．

具体的にいうと，プリントアウトした残響波形，あるいは残響曲線は幅1ミリ当たり何点で表わせばその詳細を十分に表現できるか，ということです．

統計的方法では，残響波形（母集団）のパワー減衰特性を推定するに十分な標本（サンプル）の大きさはどれほどのものであればよいか，となるでしょう．

残響時間は0.1秒程度から10秒前後までです．残響時間の短い減衰波形は高いサンプリング周波数で，残響時間の長い減衰波形は低いサンプリング周波数で波形をサンプルし，1つの減衰波形に対するサンプル点数を一定とします．たとえば，サンプル点数を1,000とすると，0.1秒の残響波形のサンプリング周波数は10 kHz，10秒の残響波形のサンプリング周波数は100 Hzになります．

どちらの減衰波形も時間軸のスケールを変えるだけで同じ枠内に収まり，視覚的にも捕らえやすいものになります．このサンプリングでは帯域制限用のローパス・フィルタは使用しません．

さて，ここまでは，人間による技術に注目してきましたが，自然界に見られる優れた技術の中から1つ挙げましょう．

コウモリの音波探知システム

コウモリが音によってものを「見る」ということをスパランツァーニが発見したのは，いまから200年ほど前のことです．超音波の存在が知られていなかった当時において，そのことを認めてもらうのは困難だったことでしょう．

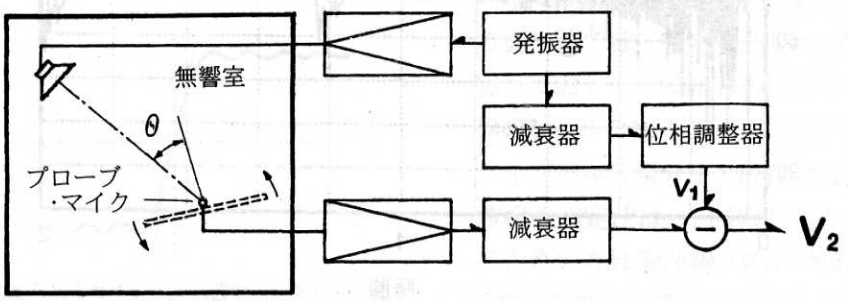
コウモリの音波探知システムに，科学的なメスが入れられるようになったのは，近年のことです．1938年，グリフィンはコウモリの音波探知能力について研究し，これをエコー・ロケーションと呼びました．コウモリの発する音波は種類により異なり，あるものはパルス状の音波，あるものは単一周期の連続波，あるいはその周波数変調波を用いています．

ノイバイラーらの研究によれば，馬蹄コウモリの内耳の基底膜による周波数分析の機能には，動物の耳に通常備わっているような広域なものに加えて，発振音81 kHzから85

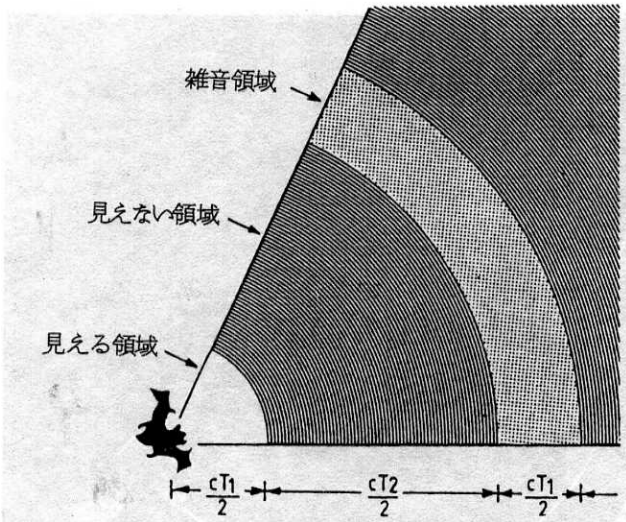
オットセイに関する難問

オットセイの母親が数週のあいだ海で採食した後にすみかに戻ると，母親と生まれたばかりの子どもは，他の何百ものオットセイの親子がいる騒々しい大群の中で，声をたよりに互いを見つけ出します．

インド洋のアムステルダム島で行われた調査によれば，最初に母親が海に出かけて戻ってきてからわずか7分で，母と子は互いに見つけることができるそうです．「子どもは生後わずか2日ほどで母親の声を認識できるようになり，母親もすぐに子どもの呼ぶ声を識別できるようになる」と，バンクーバー・サン紙は述べていますが，それにしてもSN比の極めて低い環境の下，他の何百ものオットセイの声に埋もれた中から，いったいどのようにして互いの呼び声を聴き取るのか，これは音響学的に非常に難しい問題です．



〈第7.4図〉電気的消去法による斜め入射吸音率測定．スピーカから直接マイクに到達する音は電気信号V_1によって消去され，材料で反射した音がV_2となる



〈第7.6図〉パルス状の音波を発するコウモリの"見えかた". T_1を14msとすると，検知距離は約2mになる (Wireless World, Dec. 1985)

は短くなります．耳はたいへんよくても近距離しか見えない理由は，雑音や反響音の中で目標をうまく捕らえるための，このような中耳におけるスイッチング動作によって説明することができます．

では，これを裏付ける証拠は何かあるのでしょうか．コウモリの耳小骨の動きを調節する支持筋は非常に大きく，これはレーダーにおいて強力なパルスから受信機を保護するスイッチ回路のように，コウモリも自分の出す音から耳を守るためだ，と考える学者もいますが，コウモリの出す超音波の指向性や耳介の特性からすると，そのような必要はなさそうです．

支持筋が異常なまでに大きいのは，中耳におけるスイッチングが発振音を遮断するためではなく，これに同期して反射音を受信するゲート回路として動作するためでしょう．

コウモリの雑音対策は2種類あり，1つは馬蹄コウモリのように発振音の周波数にマッチした周波数の窓（帯域フィルタ）を用いる周波数領域での信号処理，もう1つは，大型褐色コウモリのように発振音の発生時間にマッチした時間の窓（ゲート回路）を用いる，時間領域での信号処理です．

いずれも洗練された高度な信号処理で，人間の技術を超えています．

7章のキー・ワード説明

●インパルス波形とステップ波形

振幅1のコサイン波形$\cos nx$を低い周波数から高い周波数までN個加え合わせると，$x = 0$で高さNのピークをもった波形になります．十分に低い周波数から十分に高い周波数まで，このコサイン波形を無数加え合わせると，合成波形はインパルス波形になります．

振幅$1/n$のサイン波形$(1/n) \sin nx$を低い周波数から高い周波数までN個加え合わせると，$x = 0$で最大傾斜Nの波形になります．十分に低い周波数から十分に高い周波数まで，このサイン波形を無数加え合わせると，合成波形はステップ波形になります．

それぞれの周波数成分に関して，コサイン波形の積分はサイン波形，サイン波形の微分はコサイン波形になります．

●同期加算

入力インパルス信号に対する系の応答波形を繰り返し測定し，応答波形の時間軸を一致させて加え合わせ，平均すると，加算回数が大きくなるほど応答波形に対する雑音波形の大きさは相対的に小さくなります．同期加算（Averaging）と呼ばれるこの方法を使えば，N回の加算平均によって雑音成分のパワーはほぼ$1/N$になります．

●差分累積

雑音に埋もれたインパルス応答の観測波形を2乗して，これを応答を含んだ区間1（前半）と応答を含まない区間2（後半）に等分すると，区間1にはインパルス応答の2乗波形，雑音の2乗波形およびインパルス応答と雑音をかけ合わせた波形が含まれ，区間2には雑音の2乗波形が含まれることになります．

そこで，2乗した観測波形の前半と後半の差を取り，多数の観測波形から得たこの差分の平均を求めると，インパルス応答のパワーが得られます．雑音の抑圧効果は同期加算よりも大きいですが，応答波形の測定には使えません．

●同期乗算

インパルス応答を2乗して十分に長い時間積分すれば，積分時間の長さに関係なく積分値は一定の値，すなわち，インパルス応答のパワーになります．しかし，時間の多少にかかわらず測定したインパルス応答には雑音成分が加わるために，応答の2乗を積分すると，積分時間に比例して雑音のパワーが累積し，インパルス応答の真のパワーとはかけ離れた値になります．

そこで，雑音を2乗することなくインパルス応答の2乗を得るために，2回の測定で得た応答を，時間軸を一致させてかけ合わせます．この同期乗算（Synchronous response multiplication）によって得た2乗波形を積分すると，雑音成分は平均値0の変動量となり，積分時間とともに増大することはありません．残響曲線の測定にこの方法を用いるときは，同期の精度が重要になります．